编号： 161123

除湿换热器尺寸结构对其热湿传递特性的研究

孙香宇 代彦军 赵 耀 葛天舒 王如竹

（上海交通大学制冷与低温工程研究所，上海 200240）

摘 要： 建立了通用型除湿换热器测试平台，对两种翅片长度的除湿换热器（LDCHE和SDCHE）涂覆干燥剂前后的传热传质性能进行了测试研究。研究结果表明，与普通换热器相比，除湿换热器由于干燥剂涂层的影响，其传热能力削减 30%，压降增加 60%。其他结构尺寸不变，翅片长度增加一倍时，除湿换热器传热系数减少 50%，除湿效果提高 40%，压降增加 80%，除湿与再生的能效比均降低。增加翅片长度能够强化除湿效果，但传热性能降低，增加能耗。

关键词： 除湿换热器；翅片长度；传热传质；能效比；压降

中图分类号： TK173 **文献标识码：** A

Experimental study on heat and mass transfer characteristics of desiccant coated heat exchanger with variable structure sizes

SUN Xiang-Yu DAI Yan-Jun ZHAO Yao GE Tian-Shu WANG Ru-Zhu

（*Institute of Refrigeration and Cryogenics*, *Shanghai Jiao Tong University*, *Shanghai* 200240, *China*）

Abstract In this study, a general-purpose test platform is built to test and compare the heat and mass transfer characteristics. Two heat exchangers of different length of fins conventional/desiccant coated (LDCHE and SDCHE) are experimentally investigated and compared with the heat and mass transfer characteristics. Experimental results show that compared with the conventional heat exchanger, the heat transfer capacity of DCHE is reduced by 30% because of the heat resistance produced by desiccant coating. Pressure drop and Euler number are both increased by 60% approximately for the same reason. Doubling the length of fins decreases the heat transfer coefficient by 50%, increases the average moisture removal by 40% and pressure drop by 80%, without changing the other structure parameters. The coefficient of dehumidification and regeneration performance both decrease with double length of fins. Long length of fins can increase the capacity of dehumidification, decrease the capacity of heat transfer, and increase energy consumption.

Key words desiccant coated heat exchanger; the length of fins; heat and mass transfer; coefficient of performance; pressure drop

0 引 言

除湿换热器（Desiccant coated heat exchanger,以下简称“DCHE”）以管翅式换热器作为载体，将固体干燥剂涂覆于翅片表面。在除湿过程中，湿空气流经翅片表面，其中的水蒸气被涂覆的固体干燥剂吸附。同时，在此过程中产生的吸附热被换热器管内冷却水循环快速带走，以内冷的方式减少吸附热引起的不可逆损失，近似实现等温除湿过程。固体干燥剂逐渐吸湿饱和后，除湿换热器管内改通以高温热水，使得固体干燥剂脱附再生并重新具备除湿能力[1]。由于硅胶的再生脱附温度较低，因此可以利用太阳能、工业废热、热泵冷凝热等低品位热源进行驱动。

收稿日期：
基金项目：国家自然科学基金重点项目（No.51336004）；国家自然科学基金创新研究群体项目（No.51521004）
作者简介：孙香宇(1992-)，女，博士研究生，主要从事固体除湿空调研究。通信作者：代彦军，教授，yjdai@sjtu.edu.cn

近几年国内外学者分别从干燥剂优选[2]、除湿换热器性能测试[3-4]、数值分析[5]、数学建模[6]和系统应用[7]等多方面进行了大量的研究。显而易见，影响除湿换热器热湿传递性能的因素是多方面的，不仅包含涂覆材料、涂覆工艺、运行工况及其对应的运行策略等因素，除湿换热器其本身的结构尺寸（包括翅片长度、间距、形状和管排方式等）也是值得深入研究的重点之一。为了进一步研究除湿换热器的热湿传递及其耦合特性，作者在前人研究的基础上搭建了通用型除湿换热器测试平台（以下简称“平台”）。一方面，可以在变工况的条件下研究和验证不同因素对除湿换热器的性能影响变化；另一方面，也使得研究工作进行的更加高效，避免不必要的重复和浪费。本文通过对该实验平台的初步测试研究，重点考察了除湿换热器结构尺寸中的翅片长度对其热湿传递的性能影响。

1 测试平台介绍

1.1 测试平台原理

图 1 和图 2 分别为通用型除湿换热器测试平台的系统原理图和实际外观图。测试平台主要由三部分构成，分别是热水循环单元、冷却水循环单元以及测试风道。热水循环单元主要由热水循环泵、电加热器和储热水箱组成，通过自动调整电加热器的功率来满足对不同温度再生热水的需求。冷却水循环单元是将低温恒温槽中的冷却水通过冷却水循环泵提供给系统。处理风道由空气管路（截面尺寸：500mm×500mm）、空气电加热器、加湿器、风机组成。空气管路入口处放置电加热器和加湿器，可以根据实验需要模拟不同环境工况，并在风机的作用下变频控制风量。需测试的除湿换热器可以通过模块化的方式，在一定范围内实现任意、方便的组合和更换，以达到平台其设计初衷。

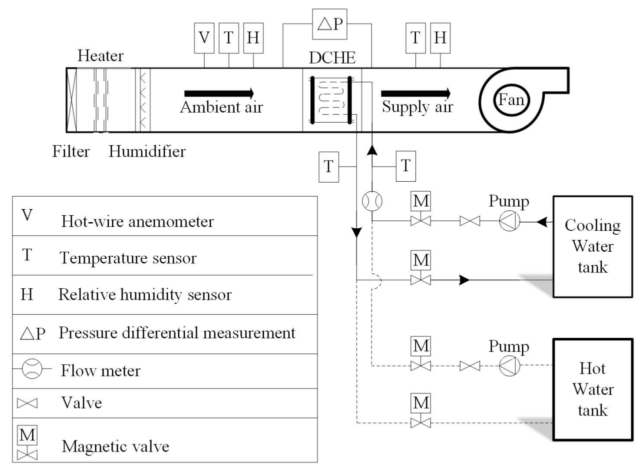


图 1 实验系统原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental set-up

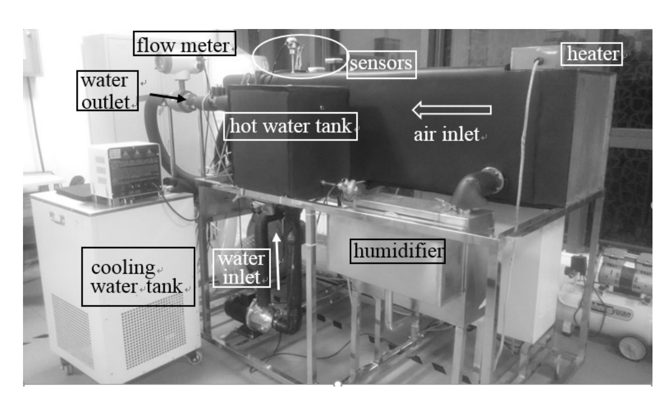


图 2 通用型除湿换热器测试平台外观图

Fig.2 Actual view of the experimental set-up

以上所述单元之间由电磁阀、水管等其他辅助设备连接，并对测试平台进行保温处理。测试平台主要设备的性能参数如表 1 所示。

表 1 测试平台主要设备性能参数表

Table1 Parameters of the devices in the experimental set-up

部件	数量	参数
除湿换热器	N(视测试情况而定）	详见表 2
储热水箱	1	容量：30L
		最大流量：$28m^3/h$
		最大扬程：20m
		额定功率：5kW,220V
低温恒温槽	1	容量：30L
		最大流量：$4\ m^3/h$
		最大扬程：8m
		额定功率：2.9kW,220V
风机	1	最大流量：$800\ m^3/h$
		额定功率：500 W,220 V

测试平台可在除湿和再生两种模式下实现切换并达到连续运行的目的。在除湿模式下，冷却水通入除湿换热器中，当处理空气通过换热器表面时，干燥剂进行湿负荷的处理，冷却水带走吸附热并进行空气显热负荷的处理；当设定的除湿时间结束后，电磁阀将水流通道切换至再生热水管道，开始再生模式，干燥剂的水分被铜管内的再生热水加热脱附，伴随处理空气排出测试平台。被测试的除湿换热器是以管翅式换热器为载体，干燥剂均匀地涂覆于翅片表面，具体尺寸参数表见表 2。

表 2 除湿换热器尺寸参数表

Table2 Structural parameters of two DCHEs

名称	数值/m
翅片长度	0.044/0.088
翅片宽	0.3
截面高	0.3
翅片厚度	0.00015
翅片间距	0.002
铜管外径	0.01
铜管内径	0.00952
铜管纵向间距	0.022
铜管横向间距	0.0254
翅片层数	142
铜管排数	24/48

1. 2 数据测量与采集

在不同工况条件下，测试平台在实验过程中需要测量的变量参数包括：

1）空气侧：除湿换热器进、出口空气干球温度（°C）和相对含湿量（%RH）；处理空气风速（m/s）；进出口空气压损（Pa）；

2）水侧：循环水流量（kg/s）；循环水进出口温度（°C）。

Agilent 34972A 数据采集器进行数据采集。表 3 列出了测试平台中所采用的传感器的规格和主要性能参数。

表 3 测试平台测量仪器设备性能参数

Table3 Specification of the different test instrumentation

测量参数	传感器	误差	测量范围
温度	PT100 温度传感器	±0.1°C	0-200°C
相对湿度	湿度传感器	±2%RH	0-100%
水流速	电磁流量计	±1.0%	1-5m/s
压损	微压差传感器	±1.0%	0-100Pa
空气流速	热线风速仪	±0.015m/s	0-50m/s

2 除湿换热器性能评价指标

从四方面进行除湿换热器的性能分析和评价：除湿换热器的传热能力，除湿换热器的除湿能力，除湿换热器除湿能效比与再生能效比以及进出口空气的压损。

2. 1 传热能力评价

在传统管翅式换热器性能评价指标中，传热系数是评价其传热效果的重要指标之一。与其类似，在除湿换热器的研究过程中，通过引入传热系数 K,W/(m^2·K)可以用来评价除湿换热器的热传递性能，以及研究干燥剂涂层在热传递方面对其的影响作用。

$$K = \frac{Q}{A(t_{a,out} - t_{a,in})} \tag{1}$$

其中，A 为换热器的总传热面积，m^2; $t_{a,in}$、$t_{a,out}$ 分别为进出口空气的温度，K；Q 为总换热量，kW。

$$Q = m_{a,out}h_{a,out} - m_{a,in}h_{a,in} \tag{2}$$

其中，$m_{a,in}$、$m_{a,out}$ 为进出口空气的质量流量，kg/s; $h_{a,in}$、$h_{a,out}$ 为进出口空气的焓值，J/kg。

2. 2 除湿能力评价

DCHE 的除湿能力评价指标，主要分别以瞬时除湿量Δd_{DE}，kg/kg(DA)、平均除湿量$\Delta d_{DE,avg}$，kg/kg(DA)和除湿率ΔM_{vDE}，kg/h 进行评价。

$$\Delta d_{\mathrm{DE}} = d_{\mathrm{a,in}} - d_{\mathrm{a,out}} \tag{3}$$

$$\Delta d_{\mathrm{DE,avg}} = \frac{\sum_0^{\tau} \Delta d_{\mathrm{DE}}}{\tau} \tag{4}$$

$$\Delta M_{\mathrm{vDE}} = \frac{\sum_0^{\tau} m_{\mathrm{a,in}} \cdot \Delta d_{\mathrm{DE}}}{\tau} \tag{5}$$

其中，$d_{a,in}$、$d_{a,out}$ 为进出口空气含湿量，kg/kg(DA); τ 为除湿周期，h。

2. 3 除湿能效比和再生能效比

DCHE 在除湿/再生过程中的潜热处理能力的评价指标为除湿能效比 ξ_{DE} 和再生能效比 ξ_{RE}，其定义式分别如下：

$$\xi_{DE} = \frac{Q_{a,DE}}{Q_{w,DE}} \tag{6}$$

$$\xi_{RE} = \frac{Q_{a,RE}}{Q_{w,RE}} \tag{7}$$

式（6）中

$$Q_{a,DE} = \Delta M_{v,DE} \cdot \gamma \tag{8}$$

$$Q_{w,DE} = m_{w,DE} c_{pw} \left(T_{w,out} - T_{w,in} \right) \tag{9}$$

式（7）中

$$Q_{a,RE} = \Delta M_{v,RE} \cdot \gamma \tag{10}$$

$$Q_{w,RE} = m_{w,RE}c_{pw}\left(T_{w,out} - T_{w,in}\right) \quad (11)$$

其中, γ 为吸附热,kJ/kg; $m_{w,DE}$、$m_{w,RE}$ 分别为冷却水质量流量与再生热水质量流量，kg/s; c_{pw} 为水的比热容，kJ/(kg·K); $T_{w,in}$、$T_{w,out}$ 分别为进出口水温,K。

2.4 进出口空气压损

$$\Delta P = P_{a,in} - P_{a,out} \quad (12)$$

其中，$P_{a,in}$ 为进口空气压力，Pa; $P_{a,out}$ 为出口空气压力，Pa。

3 实验结果及分析

冷热源提供的冷却水和再生热水温度分别为20ºC 和 50ºC，流量分别为 0.098kg/s 和 0.100kg/s，环境工况为 26.3ºC、73.4%RH 的湿空气，测试平台设定循环周期为 12min。在此基础上，在不同的风速条件下，对不同翅片长度的除湿换热器涂覆干燥剂前后的性能进行了实验研究，翅片长度为 88mm 的除湿换热器以下简称 LDCHE，翅片长度为 44mm 的除湿换热器以下简称 SDCHE，其实验结果分析如下。

3.1 除湿换热器传热能力分析

图 3 和图 4 显示了分别通入冷却水和再生热水时，不同风速下不同翅片长度换热器在涂覆干燥剂前后的传热系数比较。实验结果从三方面进行比较：水源温度影响，干燥剂涂层影响以及翅片长度影响。

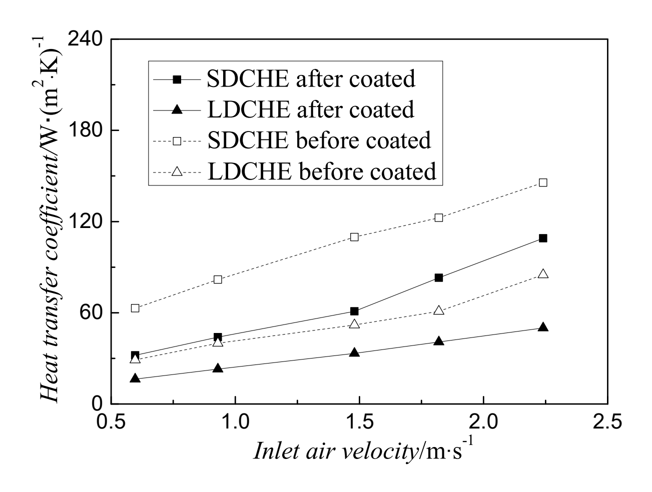


图 3 20ºC 冷水不同翅片长度及干燥剂涂层对传热能力的影响

Fig.3 Heat transfer performance with different velocities of LDCHE and SDCHE (20ºC cooling water)

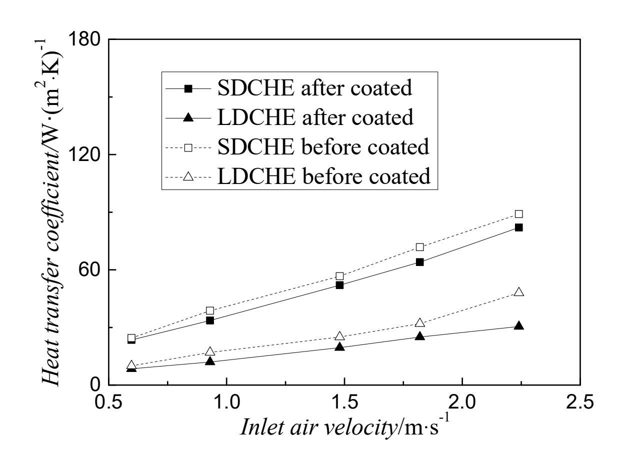


图 4 50ºC 热水不同翅片长度及干燥剂涂层对传热能力的影响

Fig.4 Heat transfer performance with different velocities of LDCHE and SDCHE (50ºC cooling water)

水源温度的影响。对于任一参数的换热器而言，通入冷却水时传热系数近似为通入再生热水时的1.7-2.5 倍，随着风速变大，比值逐渐减小。通 20ºC 冷却水的优良换热效果使除湿过程更多吸附热被带走，从而提高除湿效果。

干燥剂涂层对传热的影响。在 20ºC 水温时，SDCHE 涂覆前传热系数为涂覆后的 1.3-1.9 倍，LDCHE 涂覆前传热系数为涂覆后的 1.4-1.7 倍，风速越大，传热系数越接近，比值越小。在 50ºC 水温时，SDCHE 涂覆前传热系数为涂覆后的 1.05-1.1 倍，LDCHE 涂覆前传热系数为涂覆后的 1.1-1.3 倍，风速对传热系数的影响较小。涂覆干燥剂使得换热器的传热能力降低，涂敷干燥剂后通入冷却水传热系数降低程度大于通入再生热水时的降低程度。

翅片长度对传热能力影响。在 20ºC 水温时，涂覆前 LDCHE 传热系数为 SDCHE 的 0.46-0.58 倍，涂覆后 LDCHE 传热系数为 SDCHE 的 0.45-0.54 倍；在50ºC 水温时，LDCHE 传热系数为 SDCHE 的0.40-0.53 倍，涂覆后 LDCHE 传热系数为 SDCHE 的0.35-0.39 倍，而且随着风速增大，比值逐渐变大。

因此，干燥剂涂层产生的热阻使除湿换热器的换热能力降低了 30%。在除湿过程中，提高风速，减少干燥剂涂层厚度，缩短翅片有利于传热能力的提升。

3.2 除湿换热器除湿能力分析

平均除湿量评价了除湿换热器处理单位体积空气含湿量的能力，平均除湿量越高，单位体积空气的除湿效果越好。从图 5 可以看出，随着风速变大，除湿换热器的平均除湿量降低。当换热器迎面风速

低于 0.6m/s 时，由于空气速度较低与换热器接触充分，翅片长度对除湿能力影响较小。在大于 0.6m/s 风速时，同等风速下，LDCHE 的平均除湿量约为 SDCHE 的 1.4 倍。

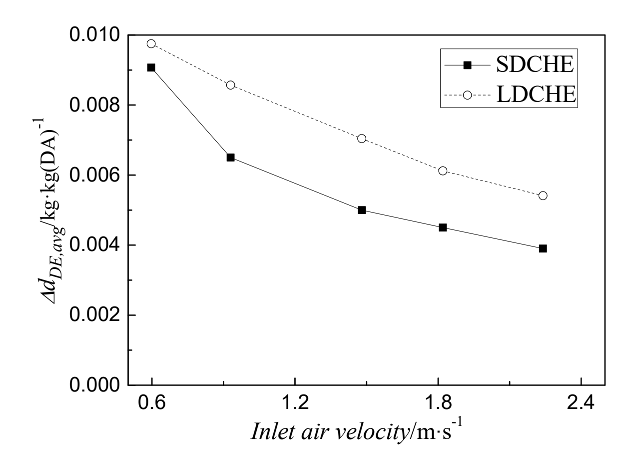


图 5 不同翅片长度换热器在不同风速下平均除湿量的比较

Fig.5 Average dehumidification removal with different velocities of LDCHE and SDCHE

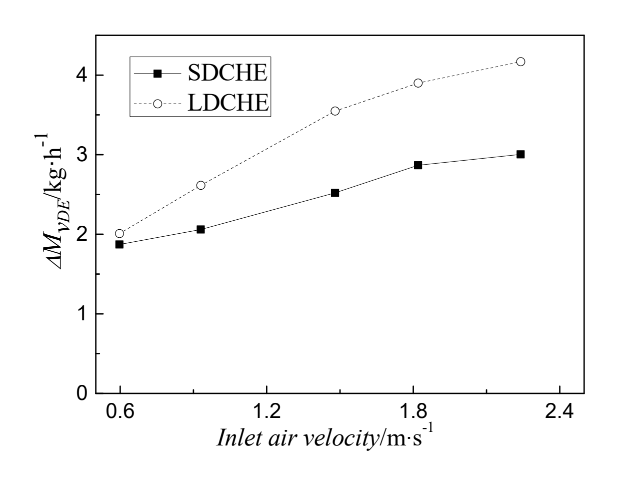


图 6 不同翅片长度换热器在不同风速下除湿率的比较

Fig.6 Average dehumidification rate with different velocities of LDCHE and SDCHE

除湿率评价了除湿换热器单位时间内处理空气含湿量的能力，除湿率越大，单位时间内空气的除湿效果越好。从图 6 可以看出，随着风速变大，除湿换热器的除湿率变大。当换热器迎面风速低于 0.6m/s 时，风量约为 210m^3/h，低风量下翅片长度对除湿能力影响较小。在大于 0.6m/s 风速时，同等风速下，LDCHE 的平均除湿量约为 SDCHE 的 1.4 倍。

由于处理空气在掠过翅片时相对湿度逐渐降低，与干燥剂的相对湿度差逐渐减小，驱动力减小，干燥剂除湿效果削弱，所以同一翅片从迎风口到出风口其涂覆的干燥剂所承担的除湿能力逐渐降低。相同涂覆状况下，其他结构尺寸参数不变，翅片长度增加一倍，除湿效果只能增加 35%-40%。

3.3 除湿换热器除湿与再生能效分析

除湿能效比与再生能效比评价了换热器在除湿与再生过程中的潜热处理能力。随着风速变大，两种换热器的除湿能效比逐渐变大，而再生能效比先增加后降低。同风速下，SDCHE 的除湿能效比约为再生能效比的 1.1-2.1 倍，风速变大比值增大；LDCHE 的除湿能效比约为再生能效比的 1.1-1.9 倍，风速增大比值增大。由于 20°C 时换热器传热系数远大于 50°C 时，所以除湿能效比要远大于再生能效比。SDCHE 的除湿能效比约为 LDCHE 的 1.28 倍，再生能效比约为 LDCHE 的 1.25 倍，同样证明了 SDCHE 的良好传热能力。

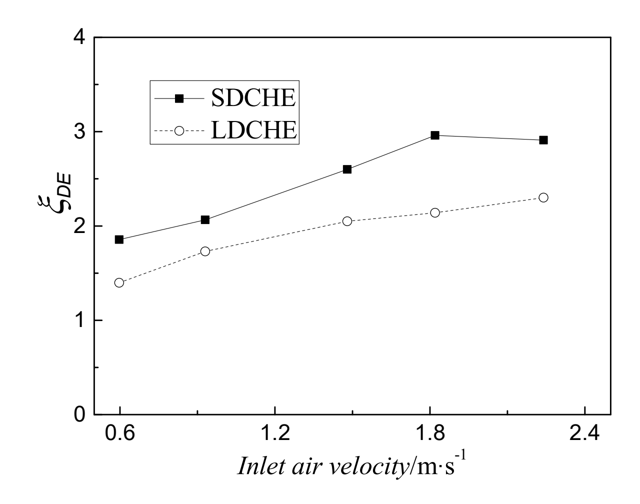


图 7 不同翅片长度换热器在不同风速下的除湿能效比

Fig.7 Coefficient of dehumidification performance with different velocities of LDCHE and SDCHE

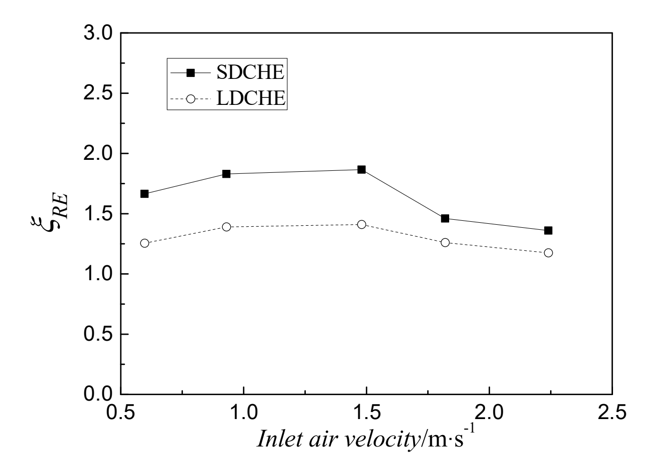


图 8 不同翅片长度换热器在不同风速下的再生能效比

Fig.8 Coefficient of regeneration performance with different velocities of LDCHE and SDCHE

3.4 进出口空气压损分析

从图 9 得出，对于任一参数的换热器，风速越大，压损越大。同风速下，除湿换热器涂覆干燥剂后的进出口空气压损为涂覆前的 1.6 倍左右。同风速下，涂覆前 LDCHE 的进出口空气压损为 SDCHE 的 1.9 倍左右；涂覆后 LDCHE 的进出口空气压损为 SDCHE 的 1.7 倍左右。由于风道本身结构带来的阻力，以及测量误差的影响，使得 LDCHE 和 SDCHE 的压损之比小于 2。

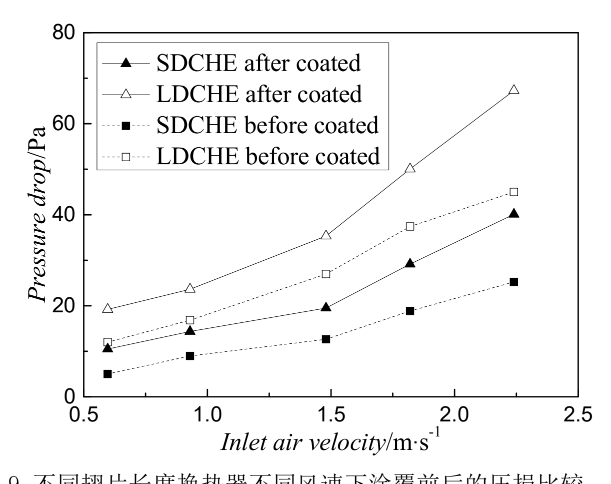


图 9 不同翅片长度换热器不同风速下涂覆前后的压损比较

Fig.9 Pressure drop with different velocities of LDCHE and SDCHE

4 结论

本文利用通用型除湿换热器测试平台，对不同翅片长度的除湿换热器进行了测试。对比实验结果，分析数据，不同翅片长度的除湿换热器在其传热能力、除湿能力、除湿与再生的能效比等方面有较大差异，结论如下：

1）翅片长度增加，其传热系数降低，当翅片长度增加一倍时，传热系数降低 50%；

2）翅片长度增加，其除湿量相应增加，当翅片长度增加一倍时，除湿效果增加 40%；

3）翅片长度增加，除湿与再生能效比均减小，但由于除湿过程中传热能力较强，除湿能效比高于再生能效比。

4）干燥剂涂层使得除湿换热器在相同环境工况下压降比普通换热器增加 60%，翅片长度增加一倍，压损增加 80%左右。

参考文献

[1] 彭作战，代彦军，腊栋，等. 太阳能再生式除湿换热器动态除湿性能研究[J]. 太阳能学报，2011，32（4）：530-536

PENG Zuozhan, DAI Yanjun, LA Dong, et al. Transient Dehumidification Performance of a Novel Regenerative Desiccant Heat Exchanger[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2011，32（4）：530-536

[2] 李献偶. 干燥剂除湿换热器强化除湿性能研究[D]. 上海：上海交通大学，2011

LI Xianou. Study on the Dehumidification Enhancement of Desiccant-coated Heat Exchanger[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University.2010

[3] 刘灿. 翅片管换热器铝箔表面吸湿涂层研究[D].广州：华南理工大学，2011

LIU Can. Study of Aluminum Foil Desiccant Coating of Finned Tube Heat Exchanger[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011

[4] Zhang L, Saikawa M, Fujinawa T. Experimental Study on Heat and Mass Transfer Characteristics for a Desiccant-coated Fin-tube Heat Exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 89:641-651

[5] ZHAO Yao, DAI Yanjun, GE Tianshu, et al. On Heat and Moisture Transfer Characteristics of a Desiccant Dehumidification Unit Using Fin Tube Heat Exchanger With Silica Gel Coating[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 91:308-317

[6] Li A, Thu K, Ismail A B, et al. A Heat Transfer Correlation for Transient Vapor Uptake of Powdered Adsorbent Embedded Onto the Fins of Heat Exchangers[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93:668-677

[7] Kumar A, Yadav A. Experimental Investigation of Solar Driven Desiccant Air Conditioning System Based on Silica Gel Coated Heat Exchanger[J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 69:51-63